

کاربرد فناوری ارتباطات خودرویی در کاهش تغییرات زمان سفر اتوبوس‌های BRT نسبت به جدول زمانبندی حرکت آنها

حمیدرضا عطائیان^۱، مجید عشوری^۲، زینب کاموسی^۳، ریحانه نامداری^۴، الهام دادوند^۵، فرحناز زینالی^۶،
جواد هاشمی نژاد^۷

۱- عضو هیئت علمی جهاد دانشگاهی صنعتی شریف

۲ و ۳- کارشناس ارشد فناوری اطلاعات جهاد دانشگاهی صنعتی شریف

۴- کارشناس عمران شرکت کنترل ترافیک تهران

۵- کارشناس فناوری اطلاعات جهاد دانشگاهی صنعتی شریف

۶- کارشناس ارشد مهندسی صنایع جهاد دانشگاهی صنعتی شریف

۷- کارشناس ارشد علوم کامپیوتر جهاد دانشگاهی صنعتی شریف

چکیده

سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی در کلان‌شهرها از جایگاه ویژه‌ای در حمل‌ونقل درون‌شهری برخوردار هستند و حجم بالایی از بار سفرهای درون‌شهری را برعهده دارند. توسعه فناوری‌های مرتبط با بهبود خدمات در این بخش به افزایش بهره‌وری در سطح جامعه و استفاده بهینه از منابع موجود می‌انجامد. از این‌رو به منظور کاهش تقاضای استفاده از خودروهای شخصی در سفرهای درون‌شهری و اهمیت کاسته شدن از حجم خودروها برای روان‌سازی ترافیک، بکارگیری و توسعه این نوع فناوری‌ها و کاربردهای آنها در سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی ضروری به نظر می‌رسد.

به این منظور پس از بررسی کاربردهای فناوری ارتباطات خودرویی در محیط‌های شهری، کاربرد «کاهش تغییرات زمان سفر اتوبوس‌ها نسبت به جدول زمانبندی آنها» با استفاده از فناوری DSRC به عنوان کاربرد منتخب توسط جهاد دانشگاهی صنعتی شریف و به کارفرمایی شرکت کنترل ترافیک تهران در خط ۱۰ سامانه اتوبوس‌رانی تندرو (BRT) تهران به اجرا درآمده است. مقاله حاضر به تشریح مراحل پیاده‌سازی این کاربرد و ارزیابی نتایج آن می‌پردازد.

کلید واژه: سامانه‌های حمل و نقل عمومی، فناوری ارتباطات خودرویی، کاهش تغییرات زمان سفر، DSRC

^۱ عضو گروه پژوهشی فناوری اطلاعات جهاد دانشگاهی شریف، ۶۶۰۲۴۶۲۴، ataeian@dsharif.ac.ir
^۲ عضو گروه پژوهشی فناوری اطلاعات جهاد دانشگاهی شریف، ۶۶۰۲۴۶۲۴، ashouri@dsharif.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه با قابلیت‌هایی که سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند (ITS³) نسبت به سایر روش‌های سنتی فراهم کرده است، شاهد گسترده شدن این سامانه‌ها و پررنگ شدن و حیاتی شدن نقش آنها در مدیریت حمل‌ونقل شهری هستیم. هم اکنون بیش از ۸۰ درصد کشورهای جهان توسعه سامانه‌های حمل‌ونقل هوشمند را به صورت جدی در برنامه کار خود قرار داده‌اند [۱].

با گسترش دامنه تحقیق و توسعه در زمینه‌ی این سامانه‌ها و پیشرفت فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی، به خصوص فناوری ارتباطات بی‌سیم، مفهوم جدیدی به نام فناوری ارتباطات خودرویی در سامانه‌های هوشمند حمل‌ونقل مطرح شده است که بعد جدیدی به این سامانه‌ها افزوده و نویدبخش نسل جدیدی از آنها محسوب می‌شود. یکی از مهمترین حوزه‌های بکارگیری این فناوری در سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی درون شهری می‌باشد. این حوزه به دلیل قابلیت کنترل وسایل حمل‌ونقل عمومی از سوی مدیریت ناوگان، قابلیت تجهیز کل ناوگان به دلیل محدود بودن تعداد آنها و در نتیجه عدم نیاز به ضریب نفوذ بالا برای گسترش کاربردهای مرتبط، از ظرفیت بالایی برای توسعه کاربردهای شهری و ورود این فناوری به حمل و نقل شهری برخوردار است. به علاوه از آنجایی که یکی از راه‌حل‌های اساسی تخفیف مشکلات ترافیک و ازدحام خودروها در شهرهای بزرگ، گسترش شبکه حمل‌ونقل عمومی و بویژه اتوبوس‌رانی است، کاربردهای فناوری ارتباطات خودرویی در بخش حمل‌ونقل عمومی به یکی از نقاط تمرکز اصلی پژوهش و توسعه این فناوری تبدیل شده است. کارشناسان صنعت حمل‌ونقل هوشمند در سراسر جهان بر این نکته اتفاق نظر دارند که بکارگیری این فناوری در آینده می‌تواند موجبات افزایش کارایی حمل‌ونقل عمومی را فراهم آورده و ضمن ایجاد ایمنی، راحتی و آسایش شهروندان در سفرهای خودرویی، بسیاری از مشکلات کنونی در حوزه ترافیک شهری و جاده‌ای را نیز برطرف سازد.

در این راستا و برای ارائه خدمات بیشتر در بخش حمل‌ونقل عمومی، گروه پژوهشی فناوری اطلاعات جهاد دانشگاهی صنعتی شریف در ادامه مطالعات خود پیرامون فناوری ارتباطات خودرویی و انجام پروژه ملی «طراحی و پیاده‌سازی سامانه ارتباطات هوشمند خودرویی» [۲][۳]، پروژه «مطالعه کاربردهای عملیاتی سامانه ارتباطات هوشمند خودرویی مبتنی بر فناوری DSRC در محیط‌های شهری و پایلوت کاربرد منتخب» را با کارفرمایی شرکت کنترل ترافیک تهران در طول سال‌های ۹۳-۹۴ به انجام رسانده است.

³ Intelligent transportation Systems

به همین منظور مطالعات اولیه بر روی کاربردهای متصور فناوری ارتباطات خودرویی در سامانه BRT، ارزش افزوده حاصل از این کاربردها و چالش‌هایی که در روند توسعه آنها ممکن است وجود داشته باشد، با انجام رسید. در نتیجه این مطالعات، کاربرد «کاهش تغییرات زمان سفر اتوبوس‌ها نسبت به جدول زمان‌بندی آنها» با توجه به تعدد تجارب جهانی در پروژه‌های مرتبط با آن و تاثیر بارزی که در افزایش رضایتمندی و اقبال بیشتر شهروندان به استفاده از حمل‌ونقل عمومی می‌تواند داشته باشد و با توجه به نیازمندی‌های عملیاتی در خطوط اتوبوس‌رانی سامانه BRT، به عنوان کاربرد منتخب برای آزمون توانمندی‌های این فناوری در محیط‌های شهری در نظر گرفته شد.

در ادامه این مقاله ابتدا مروری بر مفاهیم فناوری ارتباطات خودرویی صورت گرفته است. سپس کاربرد کاهش تغییرات زمان سفر اتوبوس‌های BRT نسبت به جدول زمان‌بندی حرکت آنها معرفی شده است که با استفاده از قابلیت اولویت‌دهی عبور اتوبوس‌ها در تقاطع‌های مجهز به چراغ‌راهنمایی قابل اجرا می‌باشد. پس از آن، نحوه پیاده‌سازی این کاربرد در مسیر منتخب، معیارهای ارزیابی و تحلیل نتایج حاصل از اجرای کاربرد و در انتها، جمع‌بندی مطالب مقاله ارائه شده است.

۲- مروری بر فناوری ارتباطات خودرویی

۲-۱- معرفی فناوری

خودروی مجهز به فناوری ارتباطات خودرویی یا به عبارتی خودروی مرتبط، وسیله نقلیه‌ای است که از اطلاعات ارسال شده از خودروهای اطراف خود و یا از تجهیزات مستقر در کنار مسیر استفاده می‌کند. این اطلاعات می‌توانند آگاهی موقعیتی راننده را نسبت به شرایط پیرامونی خود به گونه‌ای ارتقا بخشند که حسگرهای درونی خودرو به هیچ وجه قادر به انجام آن نیستند.

یک سامانه ارتباطات هوشمند خودرویی در ساده‌ترین شکل خود از دو جزء اصلی تجهیزات درون خودرویی (OBU)^۴ و تجهیزات کنار مسیر (RSU)^۵ تشکیل شده‌است. ارتباط بین OBU خودروها با یکدیگر (ارتباطات V2V)^۶ و همچنین با RSUها (ارتباطات V2I)^۷ و داده‌هایی که میان آنها مبادله می‌شوند، اساس کار این سامانه را تشکیل می‌دهد. سپس این تجهیزات براساس نوع کاربرد از طریق بستر مخابراتی راه دور با مراکز گردآوری و پردازش داده‌های ترافیکی و یا مراکز کنترل ترافیک نیز به مبادله اطلاعات می‌پردازند.

⁴ On-Board Unit

⁵ Road-Side Unit

⁶ Vehicle-to-Vehicle

⁷ Vehicle-to-Infrastructure

آنچه فناوری ارتباطات خودرویی را از سایر فناوری‌های مرسوم ITS متمایز می‌سازد، کاربرد ارتباطات بی‌سیم است. از میان فناوری‌های ارتباطات بی‌سیم از جمله ارتباطات شبکه سلولی (تلفن همراه)، فناوری ارتباطات برد کوتاه اختصاصی (DSRC)⁸ که در باند فرکانسی ۵,۹ گیگاهرتز عمل می‌کند به علت تأخیر بسیار کوتاه و برد قابل قبول برای ارتباطات محلی (که برای ارتباطات خودرو با خودرو، ۳۰۰ متر و برای ارتباطات خودرو با تجهیزات کنار مسیر، ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته می‌شود) به عنوان فناوری مطلوب و بدون جایگزین در کاربردهای ارتباطات خودرویی شناخته شده است.

۲-۲- معماری سامانه

شکل ۱ معماری کلی یک سامانه مبتنی بر ارتباطات خودرویی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، اجزاء اصلی این سامانه عبارتند از:

- (۱) تجهیزات درون خودرویی یا OBUها که شامل اجزاء زیر هستند:
 - تجهیزات پردازشی خودرو،
 - تجهیزات ارتباطی در محیط خودرویی بر اساس استاندارد IEEE 802.11p،
 - تجهیزات جمع‌آوری داده حسگرها و تجهیزات الکترونیکی خودرو،
 - تجهیزات کنترل و تنظیم‌کننده برق ورودی،
 - واسط ارتباطی برای تعامل با کاربر.
 - (۲) تجهیزات کنار مسیر یا RSUها که اجزاء زیر را شامل می‌شوند:
 - تجهیزات پردازشی،
 - تجهیزات لازم برای ارتباط با خودروها بر اساس استاندارد IEEE 802.11p،
 - تجهیزات جمع‌آوری داده تجهیزات ITS و اطلاعات محیطی (مانند اطلاعات هواشناسی)،
 - تجهیزات کنترل دمای داخلی،
 - تجهیزات تأمین، کنترل و تنظیم برق مصرفی،
 - تجهیزات ارتباطی راه دور.
- این تجهیزات از طریق ارتباط با تجهیزات درون خودرویی و تجهیزات ITS، اطلاعات محیطی و ترافیکی را جمع‌آوری کرده و هشدارهای ایمنی و اطلاعات ترافیکی لازم را در اختیار

⁸ Dedicated Short Range Communications

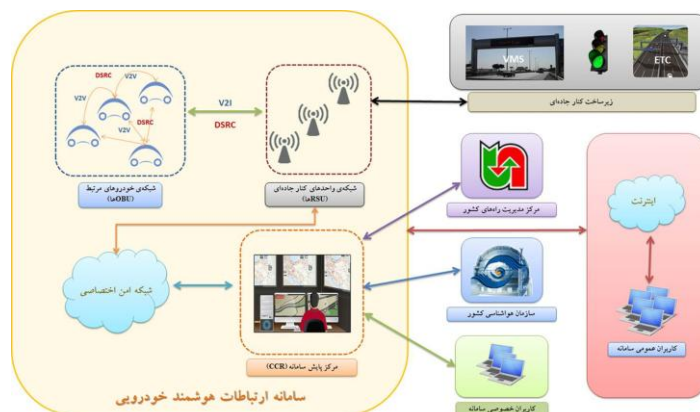
خودروها قرار می‌دهند. همچنین اطلاعات جمع‌آوری شده توسط این تجهیزات به مرکز کنترل و مانیتورینگ سامانه موسوم به CCR⁹ ارسال می‌شوند.

(۳) بستر مخابراتی راه دور (WAN)¹⁰

به منظور انتقال اطلاعات جمع‌آوری شده در تجهیزات کنار مسیر و ارسال پیام‌های ترافیکی از مرکز به خودروها و همچنین مانیتورینگ و کنترل تجهیزات از راه دور، از بستر شبکه ارتباطات سلولی به عنوان بستر مخابراتی راه دور استفاده می‌شود.

(۴) مرکز کنترل و مانیتورینگ سامانه یا CCR

این مرکز وظیفه کنترل و مانیتورینگ تجهیزات، جمع‌آوری داده‌های عبوری خودروها، مدیریت اطلاعات ایمنی و ترافیکی و ارسال پیام‌های لازم به خودروها را بر عهده دارد. در این مرکز اطلاعات لازم برای تولید پیام‌های ایمنی و ترافیک مورد نیاز خودروها از سایر مراکز مرتبط مانند مرکز مدیریت راه‌های کشور و سازمان هواشناسی کشور دریافت می‌شوند.



شکل ۱: معماری یک سامانه مبتنی بر ارتباطات خودرویی

براساس مبادله داده‌ها بین اجزای مختلف این سامانه و در پاسخ به نیازهای دنیای واقعی پیرامون ما، کاربردهای متنوع سامانه ارتباطات هوشمند خودرویی طراحی شده و به اجرا گذارده می‌شوند. این کاربردها در سه حوزه اصلی و مورد نیاز صنعت حمل‌ونقل شامل بهبود ایمنی، روان‌سازی ترافیک و کاهش آلاینده‌گی زیست‌محیطی [۴] تعریف شده و در محیط‌های شهری و جاده‌ای قابل پیاده‌سازی هستند.

⁹ Central Control Room

¹⁰ Wide Area Network

۳- معرفی کاربرد کاهش تغییرات زمان سفر اتوبوس‌ها نسبت به جدول زمانبندی آنها

کاربرد منتخب برای آزمون قابلیت‌های فناوری ارتباطات خودرویی در محیط‌های شهری با هماهنگی و توافق شرکت کنترل ترافیک تهران به این صورت تعریف شده است که تغییرات زمانبندی حرکت اتوبوس‌های BRT با استفاده از قابلیت‌های این فناوری تحت کنترل قرار گرفته و به حداقل ممکن کاهش یابد. با اجرای این کاربرد، علاوه بر کنترل نظم حرکت اتوبوس‌ها، ایمنی تردد آنها در مسیرهای حرکت، ارتقاء یافته و به افزایش رضایتمندی مسافران و ترغیب افراد جامعه به استفاده از خدمات حمل‌ونقل عمومی می‌انجامد.

این کاربرد، برای وسایل نقلیه عمومی نظیر اتوبوس‌های BRT، قابلیت اولویت‌دهی عبور از تقاطع‌های مجهز به چراغ راهنمایی را فراهم می‌کند. با توجه به اینکه اتوبوس‌های BRT دارای خطوط ویژه برای تردد در محدوده‌های شهری هستند، تخمین زمان رسیدن آنها به تقاطع‌ها و اولویت‌دهی عبور آنها بازده بالاتری نسبت به دیگر خطوط اتوبوس‌رانی دارد. اولویت‌دهی به اتوبوس‌ها می‌تواند بر حسب پارامترهای مختلفی نظیر حجم مسافر، موقعیت وسیله، حجم دیگر وسایل نقلیه واقع در مسیر، نوع خدمات حمل‌ونقل عمومی و زمان حرکت تعیین شود. این کاربرد از طریق ارتباطات DSRC، اطلاعات مربوط به وسیله نقلیه عمومی را به RSU متصل به کنترلر چراغ راهنمایی ارسال کرده و با توجه به اطلاعات دریافتی از وضعیت ترافیک تقاطع، فرمان اولویت مورد نظر را برای عبور آن صادر می‌نماید. این اولویت غالباً به صورت افزایش محدود بازه زمانی چراغ سبز و یا کاهش زمان وضعیت چراغ قرمز اعمال می‌شود.

اولویت‌دهی عبور وسایل نقلیه عمومی (TSP)^{۱۱} بویژه اتوبوس‌های درون‌شهری در بسیاری از پروژه‌های جهانی پیاده‌سازی شده و تأثیر بسزایی در کاهش زمان سفر و افزایش رضایتمندی مسافران داشته و در نتیجه به کاهش هزینه‌ها، افزایش ظرفیت و افزایش درآمد ناوگان اتوبوس‌رانی انجامیده است [۵] [۶]. برای مثال در در یکی از جاده‌های سان مائتو در ایالت کالیفرنیا، آمریکا، پیاده‌سازی این کاربرد در ۳۵ تقاطع از طریق سبز کردن زود هنگام چراغ راهنمایی و افزایش زمان سبز بودن چراغ، باعث شده است تا زمان توقف اتوبوس‌ها در تقاطع‌ها به میزان ۱۸,۵ درصد در مسیر شمالی و ۳۲ درصد در مسیر جنوبی کاهش داشته باشد. همچنین با پیاده‌سازی این کاربرد در این جاده، متوسط زمان حرکت اتوبوس‌ها ۴,۹ درصد در مسیر شمالی و ۵,۶ درصد در مسیر جنوبی کاهش داشته است [۷]. در شهر لوس‌آنجلس نیز پیاده‌سازی این کاربرد در ۲۱۱ تقاطع باعث ۷,۵٪ کاهش زمان سفر شده است و در دو مسیر آزمون، به نتیجه ۳۳٪ و ۳۶٪ کاهش زمان توقف اتوبوس‌ها در تقاطع‌ها رسیده است [۸].

¹¹ Transit Signal Priority

۴- تشریح پیاده‌سازی کاربرد

در پیاده‌سازی این کاربرد تعداد ۱۰ دستگاه از اتوبوس‌های خط شماره ۱۰ سامانه BRT شهر تهران (بزرگراه آیتا.. اشرفی اصفهانی، مسیر میدان آزادی به دانشگاه آزاد و برعکس) به OBU و پنل اعلام وضعیت به راننده مجهز شده‌اند. شکل ۲، نحوه نصب این تجهیزات را نشان می‌دهد. همچنین در مسیر حرکت این اتوبوس‌ها، در سه تقاطع مرزداران، باغ‌فیض و پونک، تجهیزات کنار مسیر RSU نصب گردیده و اتصال این تجهیزات به کنترلرهای چراغ راهنمایی که از نوع SCATS^{۱۲} هستند، برقرار شده است. برقراری ارتباطات مورد نیاز بین RSUها و مرکز کنترل و مانیتورینگ سامانه (CCR) با استفاده از شبکه ارتباطات سلولی (تلفن همراه) صورت گرفته است.



شکل ۲: (سمت راست) نصب تجهیزات OBU و (سمت چپ) نصب پنل اعلام وضعیت به راننده در داخل اتوبوس

شرح کاربرد مطابق زیر می‌باشد:

۱. در ابتدا جدول زمانبندی حرکت اتوبوس در OBU آن بارگذاری می‌شود. با استفاده از این جدول و در نظر گرفتن زمان اعزام هر اتوبوس، تصمیمات مورد نیاز برای کاهش تغییرات زمان سفر گرفته خواهد شد. زمان اعزام هر اتوبوس از آن جهت که زمانبندی رسیدن به ایستگاه‌ها بر اساس آن انجام می‌شود، نقش مهمی در اجرای کاربرد ایفا می‌کند. بنابراین تصمیم در خصوص جلو بودن از زمانبندی مورد انتظار و یا عقب بودن از این زمانبندی، بر اساس زمان اعزام اتوبوس اتخاذ می‌شود. قابل ذکر است که جدول زمانبندی حرکت اتوبوس‌ها در فصول مختلف سال، متفاوت است و باید با توجه به شرایط ترافیکی هر فصل، تنظیم و بر روی OBU اتوبوس‌ها بارگذاری شود.

¹² Sydney Coordinated Adaptive Traffic System

۲. در هر ایستگاه وضعیت فعلی اتوبوس نسبت به زمانبندی حرکت مورد انتظار آن بررسی می‌شود. بر این اساس هر اتوبوس می‌تواند در یکی از ۳ وضعیت: (۱) عادی، (۲) جلوتر از زمانبندی و (۳) عقب‌تر از زمانبندی، قرار داشته باشد.
۳. زمان بررسی آهنگ حرکت اتوبوس نسبت به جدول زمانبندی مورد انتظار در لحظه ورود اتوبوس‌ها به ایستگاه خواهد بود. در این لحظه، زمان رسیدن اتوبوس به ایستگاه با زمانبندی مورد انتظار مقایسه شده و در صورتی که حداکثر به میزان e از این زمان فاصله داشته باشد، در وضعیت عادی قرار می‌گیرد. در صورتی که تفاضل زمان رسیدن به ایستگاه از زمان مورد انتظار، عدد مثبتی بیش از مقدار e باشد، نشان دهنده وضعیت عقب‌تر از زمانبندی و در صورتی که این تفاضل عدد منفی کمتر از مقدار $-e$ باشد، نشان دهنده وضعیت جلوتر از زمانبندی است.
۴. در صورتی که اتوبوس در وضعیت عادی قرار داشته باشد عمل خاصی انجام نخواهد شد.
۵. در صورتی که اتوبوس در وضعیت عقب‌تر از زمانبندی قرار گرفته باشد، اولویت‌دهی به عبور اتوبوس از محل تقاطع یا تقاطع‌های بعدی، راهکار اصلی کاهش میزان تأخیر در حرکت آن است. مکانیزم اولویت‌دهی عبور به این صورت خواهد بود که زمان چراغ سبز در محل تقاطع به مدت محدودی (حداکثر ۲۰ ثانیه) اضافه می‌شود تا امکان عبور اتوبوس از تقاطع بدون توقف فراهم شود. برای این منظور قبل از رسیدن اتوبوس به چراغ راهنمایی، در صورتی که اتوبوس واجد شرایط اعطای اولویت باشد، درخواستی برای گرفتن اولویت عبور ارسال می‌کند. چنانچه این درخواست با سیاست‌های اعطای اولویت به اتوبوس‌ها (برای مثال هر دو دقیقه تنها یک اولویت در یک چراغ قابل اعطا است) منافاتی نداشته باشد، به درخواست واصله پاسخ مثبت داده خواهد شد. برای ایستگاه‌هایی که قبل از چراغ راهنمایی قرار ندارند، درخواست اولویت در فاصله مشخصی قبل از چراغ ارسال می‌شود. اما در حالتی که ایستگاه اتوبوس درست قبل از چراغ واقع شده باشد، درخواست اولویت با تشخیص حرکت اتوبوس به سمت چراغ ارسال خواهد شد.
۶. در صورتی که اتوبوس در وضعیت جلوتر از زمانبندی قرار داشته باشد، از راهکار توقف بیشتر در ایستگاه‌ها استفاده خواهد شد: در این حالت، پیغامی مبنی بر توقف بیشتر اتوبوس در ایستگاه به راننده داده می‌شود. البته به دلیل احتمال ایجاد عدم رضایت در مسافران نمی‌توان مدت زمان توقف در ایستگاه را بیش از مدت مشخصی افزایش داد. در حال حاضر زمان افزایش توقف در ایستگاه ۱۵ ثانیه می‌باشد. اعلام توقف بیشتر در ایستگاه از طریق چراغ‌های LED پنل نصب شده در داخل اتوبوس (تصویر سمت چپ در شکل ۲) به اطلاع راننده رسانیده می‌شود.

۵- ارزیابی عملکرد

۵-۱- معیارهای ارزیابی

همانطور که ذکر شد، هدف اصلی اجرای کاربرد، کاهش تغییرات زمان سفر نسبت به جدول زمانبندی اولیه حرکت اتوبوس‌ها می‌باشد. بنابراین پارامتر اصلی برای ارزیابی این کاربرد، میزان تغییرات زمان سفر نسبت به این جدول زمانبندی است. همچنین همان‌طور که قبلاً مورد اشاره قرار گرفت، در این کاربرد برای رعایت زمان رسیدن به ایستگاه‌ها طبق جدول زمانبندی، دو راهکار زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

۱. اولویت‌دهی عبور در تقاطع‌ها به اتوبوس‌هایی که از زمانبندی عقب هستند.

۲. اعلام توقف بیشتر در ایستگاه‌ها به رانندگان در صورتی که از زمانبندی جلو باشند.

اثر بخشی هر یک از این دو راهکار، معیارهای دوم و سوم برای ارزیابی اثربخشی اجرای کاربرد خواهند بود. در ادامه هر یک از این معیارها تشریح شده‌اند:

۵-۱-۱- میزان تغییرات زمان سفر

برای ارزیابی این معیار، از جدول زمانبندی حرکت اتوبوس‌ها استفاده می‌شود. جدول زمانبندی حرکت، ماتریسی است که در آن زمان رسیدن اتوبوس به هر یک از ایستگاه‌ها، در بازه‌های زمانی مختلف در روز تخمین زده شده است. وضعیت مطلوب در این کاربرد، رسیدن به موقع اتوبوس‌ها طبق جدول زمانبندی می‌باشد. بنابراین کاهش تغییرات زمان سفر نسبت به جدول زمانبندی در هر یک از ایستگاه‌ها مورد انتظار است. برای اندازه‌گیری میزان تغییرات زمان سفر، در هر ایستگاه قدر مطلق مقدار اختلاف زمان واقعی رسیدن به ایستگاه از جدول زمانبندی محاسبه می‌شود و سپس میانگین تمامی این مقادیر برای ایستگاه محاسبه می‌شود. نتایج به دست آمده، نشان دهنده میزان متوسط تغییرات از جدول زمانبندی در ایستگاه می‌باشد.

۵-۱-۲- اثربخشی اولویت‌دهی عبور از تقاطع

اثربخشی اولویت‌دهی عبور از تقاطع، به طور مجزا برای هر یک از چراغ‌های راهنمایی که در آن اولویت عبور اعطا می‌شود و نیز برحسب مسیری که در آن اتوبوس‌ها اولویت عبور می‌گیرند، ارزیابی می‌شود. به عبارت دیگر برای هر یک از تقاطع‌های مرزداران، باغ فیض و پونک و با توجه به مسیر حرکت اتوبوس‌ها (جنوب به شمال و شمال به جنوب) به طور مجزا عملکرد اولویت‌دهی بررسی خواهد

شد. کاهش تغییرات زمان سفر نسبت به جدول زمانبندی معیاری است که مطلوب می‌باشد. میزان تغییرات زمان سفر نسبت به جدول زمانبندی offset نامیده می‌شود. به منظور بررسی عملکرد و اثربخشی اولویت‌دهی عبور، اختلاف offset در ایستگاه‌های قبل و بعد از چراغ راهنمایی محاسبه می‌شود. برای مثال در تقاطع مرزداران در مسیر آزادی به دانشگاه (جنوب به شمال) اختلاف offset بین ایستگاه مرزداران-شمال و باغ فیض-شمال محاسبه می‌شود و سپس بر روی تمامی اختلاف offset‌های بدست آمده میانگین گرفته می‌شود. چنانچه عدد به دست آمده بزرگتر از صفر باشد، نشان دهنده کاهش تغییرات نسبت به جدول زمانبندی است و در صورتی که این عدد کوچکتر از صفر باشد حاکی از عدم بهبود وضع با توجه به اولویت عبور اعطا شده می‌باشد.

۳-۱-۵ اثربخشی اعلام توقف به رانندگان

اثربخشی اعلام توقف به رانندگان در ایستگاه‌ها، معیاری دیگر است که در ارزیابی عملکرد کاربرد مورد توجه قرار گرفته شده است. در زمانی که اتوبوسی در یک ایستگاه بیش از ۶۰ ثانیه از زمانبندی جلو باشد ($offset < -60$) چراغ قرمز LED برای راننده روشن می‌شود تا اتوبوس مدت زمان بیشتری در ایستگاه توقف کند. داده‌های به دست آمده از رفتار رانندگان بیانگر این نکته است که در بسیاری از مواقع توجهی به اعلام توقف بیشتر در ایستگاه نمی‌شود. بنابراین برای درک بهتر میزان اثرگذاری اعلام توقف، مواردی که راننده به این اعلام توجه کرده است از مواردی که به آن توجهی نداشته و کمتر از زمان پیشنهادی در ایستگاه توقف نموده، باید متمایز شوند. همچنین به منظور محاسبه و سنجش میزان تأثیرگذاری اعلام توقف، اختلاف زمان offset در ایستگاه فعلی و ایستگاه بعدی محاسبه می‌شود. در صورتی که این مقدار بزرگتر از صفر باشد، بیانگر بهبود روند حرکت اتوبوس‌ها و کاهش فاصله زمانی اتوبوس با جدول زمانبندی می‌باشد.

۳-۲-۵ روش جمع‌آوری داده‌ها

برای تحلیل نتایج باید مقایسه‌ای بین حالتی که کاربرد کاهش تغییرات زمان سفر فعال شده است، با حالت غیرفعال این کاربرد، صورت گیرد. همانطور که اشاره شد، در اجرای پایلوت بر روی ۱۰ دستگاه اتوبوس، تجهیزات ارتباطات خودرویی نصب شده است. برای مقایسه عملکرد کاربرد تغییرات زمان سفر در شرایط یکسان، این کاربرد بر روی ۵ دستگاه اتوبوس فعال و بر روی ۵ دستگاه دیگر غیر فعال شده است و در این ۵ دستگاه صرفاً داده‌های حرکتی آنها جمع‌آوری شده‌اند. همچنین با توجه به مشکلاتی که حرکت اتوبوس‌ها در ایستگاه‌های ابتدایی (میدان آزادی و دانشگاه آزاد) داشته‌اند،

ایستگاه‌های صادقیه و مخابرات به ترتیب به عنوان ایستگاه‌های شروع در دو مسیر جنوب به شمال و شمال به جنوب در نظر گرفته شده و جدول زمانبندی نیز بر اساس زمان شروع از این ایستگاه‌ها در اتوبوس‌ها بارگذاری شده است.

۳-۵- نتایج ارزیابی

۳-۱-۵ نتایج اثربخشی اولویت‌دهی عبور به اتوبوس‌ها

در حال حاضر در سه تقاطع و در مجموع در ۵ موقعیت زیر اولویت عبور به اتوبوس‌ها داده می‌شود:

۱. تقاطع مرزداران به سمت شمال،
۲. تقاطع مرزداران به سمت جنوب،
۳. تقاطع باغ فیض به سمت شمال،
۴. تقاطع پونک به سمت شمال،
۵. تقاطع پونک به سمت جنوب.

همانطور که در قسمت ۱-۱-۵ اشاره شد، در حال حاضر بررسی وضعیت اتوبوس‌ها نسبت به جدول زمانبندی در ایستگاه‌ها انجام می‌شود، به همین منظور برای تعیین میزان اثر بخشی اولویت‌دهی عبور اتوبوس‌ها از تقاطع‌ها، از داده‌های دریافت شده (offset) ایستگاه‌های قبل و بعد از چراغ راهنمایی استفاده می‌شود. البته در این روش نمی‌توان به طور دقیق اثر اولویت‌دهی عبور را در سه موقعیت که در آنها اولویت داده می‌شود به درستی مورد بررسی قرار داد. این سه موقعیت عبارتند از مرزداران به سمت شمال، باغ فیض به سمت شمال، مرزداران به سمت جنوب. علت عدم دقت در این روش این است که تقاطع‌های مرزداران و باغ فیض بین دو ایستگاه مرزداران و باغ فیض قرار گرفته‌اند. بنابراین نمی‌توان به طور مجزا اثر اولویت‌دهی در هر یک از این تقاطع‌ها را مشخص کرد. با این وصف و اینکه اثرات دو موقعیت اولویت‌دهی عبور در مرزداران به سمت شمال و باغ فیض به سمت شمال با یکدیگر ادغام می‌شود و نمی‌توان اثر هر یک را جداگانه ارزیابی کرد، لذا برای ارزیابی اولویت‌دهی عبور، چهار موقعیت خواهیم داشت که در جدول ۱ قابل مشاهده هستند. این جدول میزان تغییرات offset برای اتوبوس‌ها در موقعیت‌های مختلف را در بازه زمانی پنجم آبان ۹۴ تا پنجم آذر ۹۴ نشان می‌دهد. سطر اول از جدول نشان دهنده اثربخشی اولویت‌دهی است که در آن اختلاف میانگین تغییرات offset برای اتوبوس‌های فعال که از زمانبندی عقب‌تر هستند و به آنها اولویت داده شده است نسبت به میانگین تغییرات offset اتوبوس‌های غیرفعال که از زمانبندی عقب هستند و به آنها اولویت داده نشده است،

به دست آمده است. در واقع در صورتی که ما اتوبوس‌های غیرفعال را مبنای حرکت عادی اتوبوس‌ها در نظر بگیریم، با مقایسه با آن‌ها می‌توانیم اثر بخشی اولویت‌دهی عبور را بسنجیم. به منظور محاسبه اختلاف تغییرات offset، تغییرات offset اتوبوس‌های فعال از اتوبوس‌های غیر فعال کسر شده است. بنابراین عدد مثبت نشان دهنده بهبود و در نتیجه کاهش تغییرات زمان سفر می‌باشد. سطر دوم از این جدول متوسط زمان سفر بین دو ایستگاه قبل و بعد از چراغ راهنمایی را برای اتوبوس‌های غیر فعال نشان می‌دهد. با توجه به تغییری که در اختلاف offset به دست آمده است می‌توان نتیجه گرفت که زمان سفر بین دو ایستگاه کاهش و یا افزایش داشته است. بنابراین برای اینکه بتوان نسبتی از تاثیر کاهش تغییرات بدست آورد، در سطر سوم درصد تغییر در زمان سفر بر حسب سطر اول و دوم محاسبه شده است. واحد داده‌های دو سطر اول بر حسب ثانیه می‌باشد.

جدول ۱: تغییرات offset برای اتوبوس‌ها در موقعیت‌های مختلف

| موقعیت تغییرات | مرزداران شمال- باغ فیض شمال | پونک شمال | پونک جنوب | مرزداران جنوب |
|---|--------------------------------|---------------|----------------|---------------|
| اختلاف تغییرات offset اتوبوس‌های فعال و غیر فعال عقب‌تر از زمانبندی (S) | +۰,۹ | +۹,۵ | +۲۴ | +۱۳,۹ |
| میزان زمان سفر دو ایستگاه متوالی قبل و بعد از چراغ راهنمایی (S) | ۲۱۹ | ۱۵۵ | ۱۸۰ | ۱۸۹ |
| درصد تغییر در زمان سفر بین دو ایستگاه متوالی | %۰,۴ بهبود | %۶,۱ بهبود | %۱۳,۳ بهبود | %۷,۳ بهبود |

همانطور که مشاهده می‌شود در موقعیت پونک به سمت جنوب بهبود خوبی در میزان offset اتوبوس‌ها به دست آمده است. دلیل اصلی این اتفاق وجود مسیر اختصاصی برای حرکت اتوبوس قبل و بعد از چراغ راهنمایی می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه ایستگاه پونک-جنوب بعد از چراغ راهنمایی قرار گرفته است، اتوبوس می‌تواند در فاصله دورتری از چراغ اولویت عبور گرفته و از تقاطع عبور کند. موقعیت بعدی که اعمال اولویت در آن بهبود نسبی ایجاد کرده است، مرزداران به سمت جنوب می‌باشد. این موقعیت نیز همانند موقعیت پونک به سمت جنوب دارای مسیر اختصاصی حرکت و فاقد ایستگاه قبل از چراغ می‌باشد. اما این موقعیت همانطور که در بالا نیز به آن اشاره شد، ما بین دو ایستگاه باغ-فیض و مرزداران قرار دارد و ایستگاه باغ فیض قبل از چهارراه باغ فیض قرار گرفته است، در نتیجه دقت ارزیابی عملکرد اولویت‌دهی در موقعیت مرزداران به سمت جنوب را تحت تاثیر

قرار می‌دهد. موقعیت پونک به سمت شمال، موقعیت دیگری است که در آن با بهبودی نسبی مواجه بوده‌ایم. در این موقعیت به دلیل آنکه کمی قبل از چراغ، مسیر حرکت اتوبوس‌ها با دیگر خودروها یکی شده است، در بسیاری از مواقع امکان عبور اتوبوس‌ها از تقاطع در مدت زمانی که اولویت عبور داده می‌شود، فراهم نیست و در نتیجه بهبود حاصل از اجرای کاربرد کمتر از آن چیزی است که در مسیر پونک به سمت جنوب بدست می‌آید. در موقعیت مرزداران-باغ فیض به سمت شمال بهبود بسیار ناچیزی مشاهده می‌شود که این موضوع ناشی از دو عامل اصلی می‌باشد: (۱) قرار گرفتن ایستگاه مرزداران درست قبل از چراغ راهنمایی منجر به کاهش اثربخشی اولویت‌دهی عبور می‌گردد و اعطای اولویت در این موقعیت را با برخی دشواری‌ها همراه می‌سازد، (۲) قبل از چراغ راهنمایی باغ-فیض به سمت شمال، به خودروها اجازه داده می‌شود که در مسیر حرکت اتوبوس‌ها برای گردش به چپ و ورود به خیابان ناطق نوری و یا دور زدن به سمت جنوب بزرگراه در انتظار سبز شدن چراغ راهنمایی بایستند و در نتیجه اتوبوس نمی‌تواند از فرصت زمانی اولویت عبور برای ادامه حرکت و عبور از تقاطع استفاده کند. در شکل ۳ تصاویری که وضعیت‌های فوق‌الذکر را در این دو موقعیت نشان می‌دهند قابل مشاهده هستند.



شکل ۳: یکی شدن مسیر حرکت خودروها با خط ویژه اتوبوس در تقاطع‌های پونک و ناطق نوری (به سمت شمال)

به عبارت دیگر با توجه به اینکه در فاصله معینی از چراغ درخواست اولویت عبور ارسال می‌شود و تنها مدت زمان محدودی زمان سبز افزایش می‌یابد (از زمان ارسال درخواست اولویت، در صورتی که اتوبوس در انتهای زمان سبز باشد حداکثر ۲۰ ثانیه فرصت خواهد داشت تا از تقاطع عبور کند)، یکی شدن مسیر خط ویژه حرکت اتوبوس‌ها با خودروهای دیگر در این دو موقعیت غالباً منجر به ایجاد صف این خودروها در پشت چراغ گردش به چپ و انسداد مسیر خط ویژه می‌شود که در نتیجه آن، اتوبوس‌ها نمی‌توانند در مدت زمان تمدید چراغ سبز از تقاطع عبور کنند.

۲-۳-۵ نتایج ارزیابی اثربخشی اعلام توقف به رانندگان

اثربخشی اعلام توقف به رانندگان در ایستگاه‌ها، معیار دیگری است که در ارزیابی عملکرد کاربرد مورد توجه قرار گرفته است. نظر به اینکه عملکرد کاربرد در این قسمت متکی به همکاری رانندگان اتوبوس‌ها می‌باشد، با اجرای کارگاه‌های آموزشی، اطلاعات لازم در اختیار ایشان قرار گرفته است تا به صورت هماهنگ با آن رفتار نمایند. اما متأسفانه به دلیل عدم اعمال راهکارهای توصیه شده برای تضمین همکاری رانندگان، داده‌های به دست آمده گویای همکاری مورد انتظار از رانندگان در این بخش نمی‌باشد و بنابراین نمی‌توان از داده‌های آن به صورت کمی برای ارزیابی عملکرد کاربرد استفاده نمود. هر چند داده‌های دریافتی در دوره ارزیابی کاربرد نشان می‌دهد که تعدادی از رانندگان در برخی موارد محدود به پیام‌های سامانه برای توقف بیشتر در ایستگاه‌ها توجه داشته‌اند و همین میزان همکاری نیز در ارزیابی تغییرات زمان سفر تأثیرگذار بوده است.

۳-۳-۵ نتایج ارزیابی میزان تغییرات زمان سفر از جدول زمانبندی اولیه

در بررسی داده‌های به دست آمده برای ارزیابی میزان تغییرات زمان سفر از جدول زمانبندی اولیه، مواردی مشاهده شده‌اند که با زمان سفر متعارف اتوبوس‌ها در مسیر اجرای کاربرد تفاوت زیادی داشته‌اند. این موارد به دلیل ازدحام بیش از حد خودروها در محدوده‌های خاصی از مسیر حرکت اتوبوس‌ها مانند ترافیک صبحگاهی در مسیر شمال به جنوب، قبل از ورودی به بزرگراه نیایش، به تغییرات غیرمتعارف زمان سفر در بین ایستگاه‌ها انجامیده است. بنابراین به منظور ارزیابی میزان تغییرات زمان سفر در شرایط معمول، انحرافات بارز داده‌ها در دوره زمانی تحلیل عملکرد کاربرد با حذف ۱۰ درصد حد بالا و پائین داده‌ها نادیده گرفته شده‌اند. نتایج کلی به دست آمده نشان می‌دهد در مسیر شمال به جنوب (مسیری که شامل موقعیت‌های اولویت‌دهی پونک جنوب و مرزداران جنوب می‌باشد) میزان تغییرات زمان سفر از ۱۶۳ ثانیه در شرایط عادی به ۱۳۲ ثانیه در شرایط فعال سازی کاربرد کاهش پیدا کرده است که بهبودی در حدود ۱۹ درصد را نشان می‌دهد. در این مسیر علاوه به بهره‌مندی اتوبوس‌ها از امکان اولویت‌دهی عبور از تقاطع‌ها، به دلیل افزایش حدوداً ۱۲ درصدی تعداد دفعات جلوفتادگی از جدول زمانبندی حرکت نسبت به مسیر مقابل (به علت سرازیری مسیر شمال به جنوب)، اعلام به رانندگان برای توقف بیشتر در ایستگاه‌ها نیز توانسته است تأثیرگذار باشد. اما اتوبوس‌ها در مسیر جنوب به شمال به دلیل مشکلات مورد اشاره در بخش ۱-۳-۵ برای دریافت اولویت عبور از تقاطع‌های ناطق نوری و پونک، نمی‌توانند همانند مسیر شمال به جنوب از امکان

اولویت‌دهی عبور از این تقاطع‌ها برای جبران بخشی از عقب‌افتادگی خود از جدول زمانبندی حرکت استفاده کنند. قابل ذکر است اتوبوس‌ها به دلیل سربالایی بودن این مسیر، به طور میانگین ۱۲ درصد بیشتر از مسیر شمال به جنوب از جدول زمانبندی عقب می‌افتند و همین موضوع اهمیت اولویت‌دهی عبور را برای این مسیر بیشتر نشان می‌دهد. علاوه بر این، به دلیل آنکه با تعداد دفعات کمتری در این مسیر نسبت به مسیر شمال به جنوب با جلوافتادگی اتوبوس‌ها از جدول زمان‌بندی آنها مواجه هستیم، تأثیر اعلام توقف بیشتر در ایستگاه‌ها نیز بر کاهش تغییرات زمان سفر نسبت به مسیر مقابل کمتر ارزیابی می‌شود. لذا بنا به دلایل فوق‌الذکر، تحلیل مناسبی برای ارزیابی اجرای کاربرد بر میزان تغییرات زمان سفر نسبت به جدول زمان‌بندی حرکت اتوبوس‌ها در این مسیر قابل ارائه نمی‌باشد. علاوه بر این، قابل ذکر است که در کل مسیر منتخب برای اجرای کاربرد (شامل ۱۵ ایستگاه)، در هر سفر حداکثر امکان بهره‌مندی از اولویت عبور در دو تقاطع وجود داشته است که به طور طبیعی از ظرفیت محدودی برای بهبود تغییرات زمان سفر برخوردار می‌باشد.

۶- نتیجه گیری

مطالعات تحقیقاتی بر روی کاربردهای فناوری ارتباطات خودرویی تأثیر بارز پیاده‌سازی این کاربردها را در افزایش کارایی سامانه‌های حمل‌ونقل در جهان نشان می‌دهد. تجربیات حاصل از اجرای برخی پروژه‌ها در دنیا نشان داده است که پیاده‌سازی کاربردهای این فناوری در سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی باعث کاهش زمان سفر، کاهش تغییرات زمان سفر و کاهش آلودگی هوا خواهد شد. نتایج حاصل از اجرای آزمایشی کاربرد «کاهش تغییرات زمان سفر اتوبوس‌ها نسبت به جدول زمانبندی آنها» با استفاده از فناوری DSRC در خط ۱۰ سامانه BRT تهران نشان می‌دهد که پیاده‌سازی آن در یک مسیر منطبق با اصول مهندسی ترافیک توانسته است به ۱۹ درصد بهبود در تغییرات زمان سفر اتوبوس‌ها نسبت به جدول زمانبندی اولیه حرکت آنها بیانجامد. بر این مبنا می‌توان انتظار داشت در مسیرهایی که دارای تقاطع‌های متعدد هستند، اجرای این کاربرد بالقوه می‌تواند به بهبودهای قابل توجهی در کاهش زمان سفر و کاهش تغییرات برنامه زمانبندی حرکت اتوبوس‌های شهری منجر شود.

اجرای این کاربرد به عنوان یک پروژه تحقیقاتی برای ارزیابی قابلیت‌های فناوری ارتباطات خودرویی در محیط‌های شهری نشان داده است که کاربرد اولویت‌دهی عبور اتوبوس‌ها در تقاطع‌های شهری، هر چه شرایط ترافیکی و تمهیدات انتظامی برای جلوگیری از انسداد مسیر حرکت اتوبوس‌ها توسط سایر خودروها بیشتر مهیا باشد، با نتایج بهتری برای کاهش زمان سفر اتوبوس‌ها همراه خواهد بود. نتایج

حاصل از اجرای این پروژه همچنین مؤید آن است که برای رسیدن به بهبود مطلوب در کاهش تغییرات زمان سفر اتوبوس‌های BRT نسبت به جدول زمانبندی حرکت آنها، علاوه بر کاربرد فناوری در بخش اولویت‌دهی عبور از تقاطع‌های واقع در مسیر حرکت این اتوبوس‌ها (که با رعایت اصول مهندسی ترافیک در تقاطع‌ها می‌تواند به حداکثر کارایی خود برسد)، لازم است با ارائه آموزش‌های لازم به رانندگان و بکارگیری روش‌های تشویقی مناسب، از همکاری مؤثر ایشان برای تبعیت از فرامین اعلام شده جهت بهبود تغییرات زمان سفر نیز استفاده شود.

۷- مراجع

- [۱] سیستم‌های هوشمند حمل‌ونقل، ۱۳۸۴، محمد تقی عیسائی، انتشارات آذر.
- [۲] رستمی، ح. ، عطائیان، ح. و شریفی، م. ، سامانه ارتباطات هوشمند خودرویی و چشم انداز توسعه آن، اسفند ۱۳۹۰، یازدهمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی حمل و نقل و ترافیک، تهران،
- [۳] پایگاه اطلاع‌رسانی سامانه ارتباطات هوشمند خودرویی : www.cvt-proect.ir
- [4] Connected Vehicle Research, UDDOT Website available at : [http://www.its.dot.gov/connected_vehicle/connected_vehicle_research .htm](http://www.its.dot.gov/connected_vehicle/connected_vehicle_research.htm)
- [5] An Overview of Transit Signal Priority, July 2002, Published by the Intelligent Transportation Society of America, Washington DC.
- [6] Implementing BRT Intelligent Transportation Systems, October 2010, American Public Transportation Association, , Washington DC.
- [7] M. Li, et al., Field Operational Tests of Adaptive Transit Signal Priority Systems, PATH Research Report, Institute Of Transportation Studies University Of California, Berkeley, California, 2010.
- [8] Investment Opportunities for Managing Transportation Performance through Technology, UDDOT Website available at: http://www.its.dot.gov/press/2009/transportation_tech.htm

Connected Vehicle Application in variation reduction of BRTs travel time and their timetable

HamidReza Ataeian, Majid Ashouri, Zeinab Kamousi, Reihaneh Namdari, Elham dadvand, Farahnaz Zeinali, Javad HashemiNejad

1-Faculty Member of ACECR Sharif Branch

2,3-M.Sc Information Technology, ACECR Sharif Branch

4- B.Sc. civil engineering, Tehran Control Traffic Company

5-B.Sc Information Technology, ACECR Sharif Branch

6- M.Sc. Industrial engineering, ACECR Sharif Branch

7- M.Sc. Information Technology, ACECR Sharif Branch

Abstract

Public transportation systems in major cities have significant role in urban transportation and consist high volumes of urban traffic. Development of related technologies in this field, will increase performance and optimal use of available resources.

Due to the importance of reduction in the number of cars and to decreasing the demand of using private cars in urban trips, operation and development of such technologies seems to be necessary to increase traffic mobility. For this purpose, after studying the Connected Vehicle Technology applications in urban environments, the application of "variation reduction of BRTs travel time in comparison with their timetable" using DSRC technology is implemented as the selected application by ACECR Sharif branch and Tehran Control traffic company as the employer, at line 10 of Tehran BRT system. This article outlines the steps to implement this application and evaluation of its results.

Key words: Public Transportation systems, Connected Vehicle Technology, Travel Time reduction, DSRC